

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ IGBT ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ TRENCH СТРУКТУР

© А. А. Краснов^{1,2}, А. Н. Максимов², М. М. Крымко², С. А. Леготин¹, С. В. Корнеев²,
В. Н. Мурашев¹, М. П. Коновалов¹

¹ НИТУ «МИСиС», кафедра ФПП и ППЭ, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 4

² ОАО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Разработан IGBT транзистор с вертикальным каналом, обеспечивающий напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭнас} = 2,05$ В, пороговое напряжение $U_{зэпор} = 3,3$ В, обратное напряжение $U_{КЭ} = 617$ В. Представлены результаты экспериментальных исследований вольт-амперных и динамических характеристик образцов.

Ключевые слова: IGBT, силовая электроника, мощный транзистор, Trench структура

Сведения об авторах: Краснов Андрей Андреевич, аспирант, a_krasnov_a@mail.ru; Максимов Анатолий Нестерович; Крымко Михаил Миронович, к.т.н.; Леготин Сергей Александрович, к.т.н., доцент, serlego@mail.ru; Корнеев Сергей Викторович; Мурашев Виктор Николаевич, д.т.н., профессор, vnmurashhev@mail.ru; Коновалов Михаил Павлович, к.т.н., доцент

Благодарности: Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 годы», государственный контракт № 14.429.11.0003 от 05.03.2014

HIGH VOLTAGE IGBT BASED ON TRENCH STRUCTURES

A. A. Krasnov^{1,2}, A. N. Maximov², M. M. Krymko², S. A. Legotin¹, S. V. Korneev²,
V. N. Murashev¹, M. P. Konovalov¹

¹ NUST «MISIS», 119991, Moscow, Leninskiy prospect, 4

² JCS «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

IGBT with a vertical channel, providing collector-emitter saturation voltage $U_{CEsat} = 2,05$ V, threshold voltage $U_{CEthresh} = 3,3$ V and reverse voltage $U_{CE} = 617$ V has been developed. The results of investigation of measured current-voltage and dynamic characteristics of samples are presented.

Keywords: IGBT, power electronics, power transistor, Trench structure

Data of authors: Krasnov Andrey Andreevich, postgraduate, a_krasnov_a@mail.ru; Maximov Anatoliy Nesterovich; Krymko Mikhail Mironovich, Ph.D.; Legotin Sergey Aleksandrovich, Ph.D., associate professor, serlego@mail.ru; Korneev Sergey Viktorovich; Murashev Victor Nikolaevich, Sc.D., professor, vnmurashhev@mail.ru; Konovalov Mikhail Pavlovich, Ph.D., associate professor

Acknowledgements: Research was carried out as a part of Federal Special-purpose Program «Development of electronic component base and radioelectronics» for 2008-2015», Government Contract 14.429.11.0003, 05.03.2014

Введение

Первые разработки IGBT транзисторов были предприняты еще в начале 1980-х го-

дов, на сегодняшний день IGBT транзисторы представляют собой большую интегральную схему, состоящую из множества параллельно

соединённых элементарных ячеек. Структура IGBT комбинирует свойства биполярных и полевых транзисторов и приобретает лучшие особенности обоих типов приборов. В последнее время IGBT транзисторы получили большой толчок в развитии, так в работах [1-4] были предложены новые конструкции IGBT транзисторов с вертикальным каналом. Введение в структуру IGBT затворов в вытравленных канавках (Trench-Gate Technology) позволило резко увеличить плотность тока I_K , а также снизить напряжение на открытом ключе. В структуре IGBT с вертикальным затвором отсутствуют области между р-областями планарного транзистора, что приводит к уменьшению размеров элементарной ячейки и снижению сопротивления транзистора в открытом состоянии.

IGBT транзисторы занимают большую область высоковольтных силовых приборов с уровнями токов до десятков килоампер и обратными напряжениями до единиц киловольт [5]. IGBT транзисторы широко применяются в различных высоковольтных устройствах, таких как инверторы, системы управления электрическими двигателями и интеллектуальные силовые модули.

Целью данной работы является создание IGBT транзисторов с вертикальным каналом и исследование их параметров. При разработке транзистора одной из главных задач являлась минимизация размеров элементарной ячейки транзистора с целью улучшения статических параметров, с разрешающей способностью не более 1 мкм. В данной работе описаны параметры, определяющие структуру IGBT, выполненного по Trench технологии, и проведено исследование статических и динамических характеристик.

Параметры, определяющие структуру IGBT

Структуру IGBT транзисторов разрабатывают так, чтобы приборы могли выдер-

жать большие значения обратного напряжения ($U_{обр}$), при этом транзистор должен иметь близкие к нулевым потери, которые определяются напряжением насыщения коллектор-эмиттер ($U_{КЭнас}$). Соотношение этих характеристик и определяет уровень IGBT транзистора как силового ключа. Напряжение насыщения коллектор-эмиттер определяется падением напряжения на сопротивление открытого МОП транзистора с учётом сопротивления области дрейфа, а также контактной разностью потенциалов на р-п переходе «подложка-эпитаксиальный слой».

$$U_{КЭнас} = I_K \cdot R_{отк} + \phi_K \quad (1)$$

Поток электронов от эмиттера за счёт тянущего поля движется в область дрейфа, формируя базовый ток вертикального р-п-р транзистора. При попадании электронов в область дрейфа создаётся неравновесная концентрация электронов, тем самым вызывая модуляцию сопротивления базы транзистора, поэтому общая рассеиваемая мощность IGBT меньше, чем у МОП транзисторов при одинаковых размерах кристалла. В работе [6] описано влияние модуляции базы на сопротивление открытого транзистора, которое описывается выражением 2, где L – длина канала МОП транзистора; μ – подвижность в канале; C – удельная ёмкость подзатворного диэлектрика; W – ширина канала транзистора; U_3 – напряжение на затворе транзистора; $U_{пор}$ – пороговое напряжение транзистора; d – толщина эпитаксиального слоя; x_j – глубина залегания р-п перехода; q – заряд электрона; n_i – собственная концентрация; U_{np} – напряжение прямого смещения р-п перехода; T – температура; k – константа Больцмана; L_p – диффузионная длина:

$$R_{отк} = \frac{L}{\mu \cdot C \cdot W \cdot (U_3 - U_{пор})} + \frac{(d - x_j)}{q \cdot \mu_p \cdot n_i \cdot \exp\left(\frac{q \cdot U_{np}}{kT} - \frac{d}{L_p}\right) \cdot W \cdot d} \quad (2)$$

Первое слагаемое является сопротивлением канала МОП структуры, а второе – модулированное сопротивление области дрейфа. Следует обратить внимание на значение диффузионной длины, которая зависит от времени жизни неосновных носителей, при больших значениях обратных напряжений можно не получить эффекта усиления. Следовательно, диффузионная длина неосновных носителей в базе должна быть довольно большой, чтобы отношение d/L_p было меньше единицы. Значения времени жизни неосновных носителей для низкоомных материалов составляют от единиц до десятков микросекунд, а для высокоомных – единицы миллисекунд.

Ток коллектора для IGBT транзистора определяется из простого выражения:

$$I_k = \beta \cdot I_b, \quad (3)$$

где β – коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером; I_b – ток базы, который определяется выражением (4):

$$I_b = \frac{W}{L} \cdot \mu \cdot C \left((U_s - U_{пор}) U_k - \frac{U_k^2}{2} \right), \quad (4)$$

где U_k – напряжение коллектора; U_s – напряжение на затворе.

Ток МОП структуры создаёт высокий уровень инжекции, поэтому эффективность эмиттера можно принять равной единице и тогда коэффициент усиления β будет описываться выражением:

$$\beta = \frac{2 \cdot L_p^2}{d^2} - 1. \quad (5)$$

Определяющими параметрами обратного напряжения коллектор-эмиттер являются уровень легирования и ширина запрещённой зоны. Для плоского резкого перехода оно может быть определено из выражения [7]:

$$U_{кЭобр} = 60 \cdot \left(\frac{E_g}{1,1} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{N}{10^{16}} \right)^{-0,75}, \quad (6)$$

где E_g – ширина запрещённой зоны материала; N – уровень легирования эпитаксиального слоя.

Однако в планарных р-п переходах необходимо учитывать сильное влияние кривизны перехода. Поскольку напряжённость электрического поля на искривлённых областях перехода выше, то напряжение пробоя будет определяться именно этими областями. В работе [8] приведены нормализованные зависимости напряжения пробоя для сферического и цилиндрического переходов. На основании выражений (1)-(6) была рассчитана структура IGBT с параметрами, указанными в табл. 1.

Изготовление прибора

В качестве подложки использовалась кремниевая пластина р-типа с удельным сопротивлением 0,01 Ом·см и толщиной 450 мкм. На ней методом химического осаждения из газовой фазы (CVD)

Таблица 1

Параметры структуры IGBT транзистора

Параметры	Глубина залегания, мкм	Концентрация, см ⁻³
n ⁺ эмиттер	0,5	10 ²⁰
р- подложка	1,8	4·10 ¹⁶
n ⁻ дрейфовая область	70	3·10 ¹⁴
Толщина подзатворного окисла	0,1	
Глубина канавки	3,5	

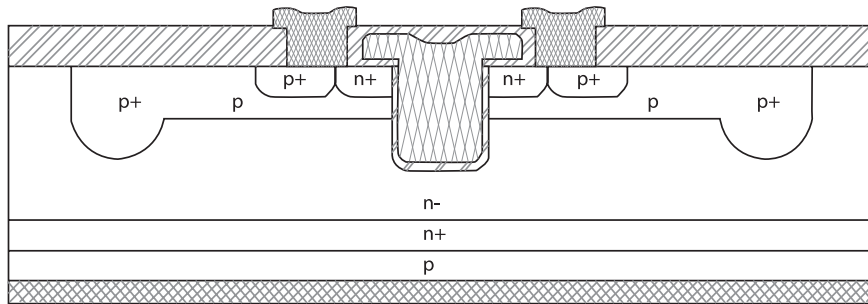


Рис. 1

Разрез структуры IGBT транзистора

выращивались слои n-типа с разным уровнем легирования. Толщина слоёв составила 7 и 70 мкм с удельным сопротивлением 0,01 и 30 Ом·см, соответственно. Для предотвращения поверхностного пробоя на периферии кристалла использовались защитные кольца [9], которые были сформированы ионным легированием бора (B) с энергией 100 кэВ и дозой 100 мкКл/см² с последующим отжигом при температуре 1150 °С в течение 9 часов, р-область транзистора формировалась ионным легированием бора с энергией 30 кэВ и дозой 8 мкКл/см², p⁺ контакт к р-области также был сформирован ионным легированием бора с энергией 40 кэВ и дозой 1200 мкКл/см², затем проводился отжиг примеси при температуре 1100 °С в инертной среде Ar+O₂ в течение 60 минут. Эмиттер транзистора изготавливался ионным легированием мышьяка (As) с энергией 100 кэВ и дозой 1500 мкКл/см² с последующим отжигом при температуре 940 °С в инертной среде Ar+O₂ в течение 70 минут. Формирование вертикальных канавок в структуре осуществлялось анизотропным плазмохимическим травлением. Глубина канавок составила 3,5 мкм. Затем на стенках канавок был сформирован подзатворный окисел толщиной 100 нм. В качестве материала затвора использовался поликремний. После формирования эмиттера и затвора обратная сторона пластины была утонена до толщины 250 мкм, затем в обратную сторону проводилось легирование бора для создания омического контакта.

Структура и фотография среза кристалла исследуемых IGBT транзисторов показана на рис. 1 и 2.

Результаты экспериментальных исследований

Статические и динамические параметры структур измерялись на установке ГАММА РХI при комнатной температуре.

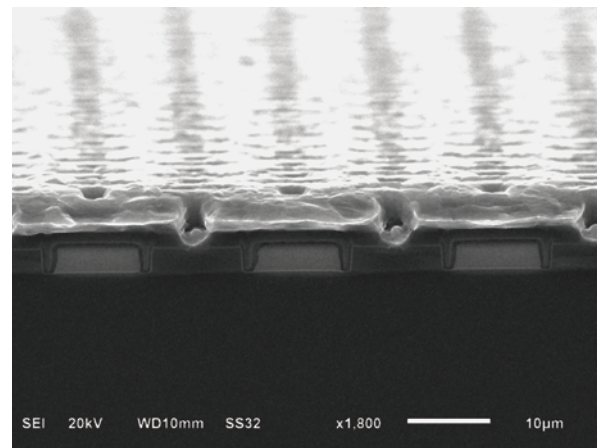


Рис. 2

Фотография среза кристалла IGBT транзистора

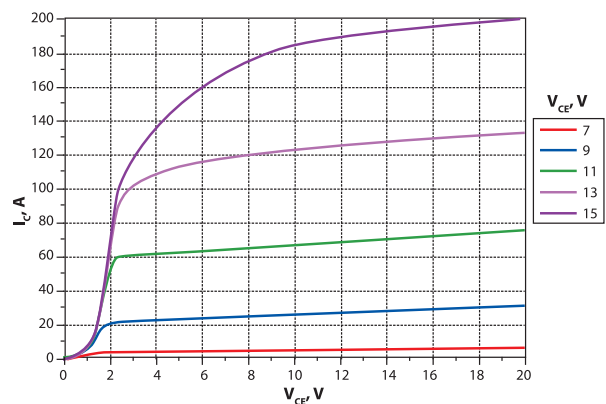


Рис. 3

Вольт-амперная характеристика IGBT транзистора

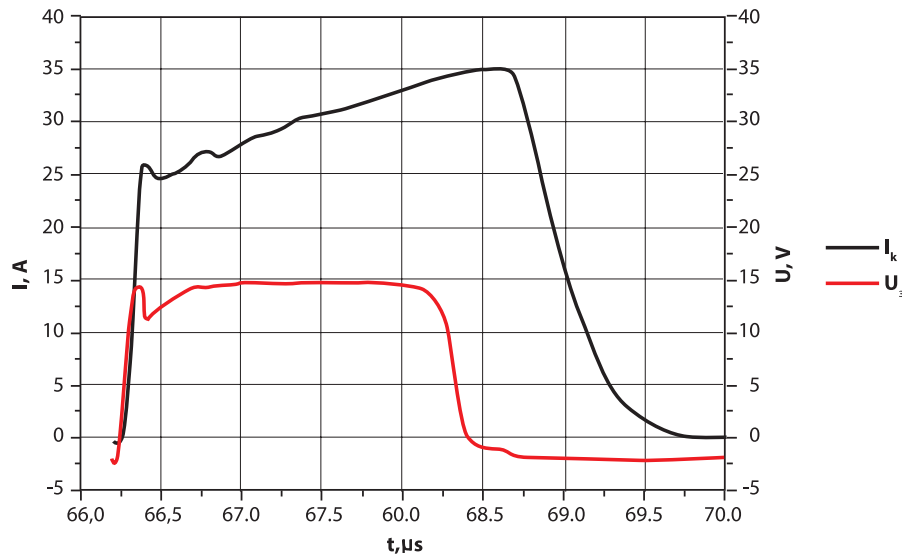


Рис. 4

Динамическая характеристика IGBT транзистора

ратуре ($T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$). На рис. 3 показаны вольт-амперные характеристики полученных IGBT транзисторов, а в табл. 2 приведены их измеренные статические параметры.

В табл. 3 приведены значения времен переключения IGBT транзисторов.

Выводы

В данной работе продемонстрирован IGBT транзистор, созданный с применением Trench технологии. В статье приведено краткое описание технологии изготовления Trench структуры IGBT транзистора,

Таблица 2

Статические параметры IGBT транзистора

Параметры	Значения	Режим измерения
$U_{КЭ}$, В	617	$I_K = 2 \text{ мА}$, $U_{3Э} = 0 \text{ В}$
I_K , А	70	$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
$U_{КЭнас}$, В	2,05	$I_K = 70 \text{ А}$, $U_{3Э} = 15 \text{ В}$
$U_{3Эпор}$, В	3,3	$I_K = 250 \text{ мкА}$
$C_{вх}$, пФ	9241	$U_{КЭ} = 30 \text{ В}$, $U_{3Э} = 0 \text{ В}$, $f = 1 \text{ МГц}$
$C_{вых}$, пФ	271	
$C_{пр}$, пФ	182	

Таблица 3

Динамические параметры IGBT транзистора

Параметры	Значения	Режим измерения
$t_{завкл}$, нс	65	$I_K = 30 \text{ А}$, $U_{КЭ} = 300 \text{ В}$, $U_{3Э} = 15 \text{ В}$
$t_{здыкл}$, нс	981	

показаны вольт-амперные характеристики и переходные процессы транзистора. Получены образцы со следующими значениями основных параметров: напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭнас} = 2,05$ В, пороговое напряжение $U_{ЭЭпор} = 3,3$ В, обратное напряжение $U_{КЭ} = 617$ В, время задержки включения $t_{эдвкл} = 65$ нс, время задержки выключения $t_{эдвыкл} = 981$ нс.

Литература

1. Chang H. R. et al. Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) with a Trench Gate Structure // IEEE International Electron Devices Meeting, Abstract 29.5, 1987, pp. 674-677.
2. Yuan X., Trajkovic T., Udreak F., Thomson J., Waind P. R., Taylor P. et al. Suppression of parasitic JFET effect in trench IGBTs by using a self-aligned p base process // Solid-State Electron, 2002, № 46, pp. 1907-1912.
3. Павлюк Д. CSTBT 5-е поколение модулей IGBT «Mitsubishi-Electric» // Силовая электроника и питание РЭ. – 2004. – № 4. – С. 4-7.
4. Винтрих А., Колпаков А. Trench-4 универсальная технология IGBT. Semikron International // Силовая электроника. – 2008. – № 2. – С. 28-30.
5. Baliga B. J. Power Semiconductor Devices. PWS, 1996.
6. Корнеев С. В., Крымко М. М., Максимов А. Н. Возможности и ограничения TRENCH МОП структур // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2013. – № 1. – С. 37-41.
7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х книгах: [пер. с англ.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
8. Ghandhi S. K. Semiconductor power devices. Wiley N.Y., 1977.
9. Kao Y. C., Wolley E. D. // Proc. of the IEEE, 1967, vol. 55, № 8, pp. 1409-1414.

References

1. Chang H. R. et al. Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) with a Trench Gate Structure // IEEE International Electron Devices Meeting, Abstract 29.5, 1987, pp. 674-677.
2. Yuan X., Trajkovic T., Udreak F., Thomson J., Waind P. R., Taylor P. et al. Suppression of parasitic JFET effect in trench IGBTs by using a self-aligned p base process // Solid-State Electron, 2002, № 46, pp. 1907-1912.
3. Pavlyuk D. CSTBT «Mitsubishi-Electric» 5th generation of IGBT modules. *Silovaya elektronika i pitanie RE* [Power electronics and supply], 2004, № 4, pp. 4-7.
4. Vintrikh A., Kolpakov A. Ultimate IGBT technology Trench-4. Semikron International. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2008, № 2, pp. 28-30.
5. Baliga B. J. Power Semiconductor Devices. PWS, 1996.
6. Korneev S. V., Krymko M. M., Maksimov A. N. Capabilities and limitations of MOS TRENCH structures. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2013, № 1, pp. 37-41.
7. Zi S. *Fizika poluprovodnikovyx priborov* [Physics of semiconductor devices]. Moscow, Mir Publ., 1984, vol. 1, 456 p.
8. Ghandhi S. K. Semiconductor power devices. Wiley N. Y., 1977.
9. Kao Y. C., Wolley E. D. // Proc. of the IEEE, 1967, vol. 55, № 8, pp. 1409-1414.